

# 高含水量水泥土工程特性试验研究

唐海斌

(中铁隧道局集团有限公司市政工程公司, 浙江 杭州 310030)

**摘要:** 为研究高含水量水泥土工程特性, 对不同配比的高含水量水泥土试块进行了无侧限抗压强度试验以及直剪试验。结果表明: 可以采用水泥土含水量与水泥掺入量的比值作为评价水泥土性质的参数, 且采用幂函数能够较好地表述水泥土强度和含水量与水泥掺入量比值的关。将龄期为 28 d 时的水泥土强度作为基准, 利用对数函数估算不同龄期下的水泥土强度值。本次试验观测到水泥土的变形模量约为强度的 86.5 倍。水泥土的内摩擦角随着强度的增加而增大, 本次试验中水泥土的无侧限抗压强度从 85.4 kPa 增加到 1 811 kPa 时, 对应的内摩擦角从 30.4° 增加到 45.0°。水泥土的黏聚力随强度的增加呈线性增大, 本次试验中黏聚力约为强度的 0.181 倍。

**关键词:** 水泥土; 工程特性; 无侧限抗压强度; 高含水量; 龄期

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)03-0256-06

## Laboratory test on engineering properties of cemented soil with high water content

TANG Hai-bin

(Municipal Engineering Company of China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Hangzhou 310030, Zhejiang, China)

**Abstract:** To investigate the engineering properties of cemented soil with high water content, unconfined compression strength tests and direct shear tests were conducted on test blocks with different water content. Results indicate that the ratio of the water content to cement content serves as a viable parameter for assessing cemented soil properties, with the relationship between cemented soil strength and the ratio aptly represented by a power function. Utilizing the cemented soil strength at 28 days as a reference, a logarithmic function is employed to predict the cemented soil strength at varying curing time. Observations reveal that the deformation modulus of cemented soil is approximately 86.5 times its strength. Moreover, the internal friction angle of cemented soil increases proportionally with the strength. During the experiment, an increase in unconfined compression strength from 85.4 kPa to 1 811 kPa corresponds to an elevation in the internal friction angle from 30.4° to 45.0°. Furthermore, the cohesion of cemented soil exhibits a linear increase with strength, and the cohesion approximately 0.181 times the strength in this work.

**Key words:** cemented soil; engineering characteristics; unconfined compression strength; high water content; curing time

## 0 引言

在软土地基中掺入水泥形成水泥土能够有效提高地基土体的承载性能, 被广泛应用于我国东南沿海软土地区地基处理工程中。水泥土的物理力学特性已经受到众多学者的广泛关注, 他们对水泥土的特性进行了深入的探究<sup>[1-4]</sup>。近年来, CONSOLI 等<sup>[5-7]</sup>通过室内试验比较了试样水灰比和试样孔隙与水泥颗粒体积比这两个参数评价水泥土强度和刚度的适用性, 他指出在非饱和状态下, 水灰比无

法很好地反映水泥土的强度特性。相比之下, 试样孔隙与水泥颗粒体积比指标更适用于评估水泥土的无侧限抗压强度, 并可作为描述水泥土初始剪切模量和有效抗剪强度的参数。

由于预制桩和钻孔灌注桩在实际工程应用中都存在一些问题, 近年来出现了许多新型桩基础, 其中混凝土芯水泥土搅拌桩<sup>[8]</sup>、高喷插芯组合桩<sup>[9]</sup>和静钻根植竹节桩等由预制桩和水泥土组成的组合桩基在实际工程中表现出良好的承载性能, 极具推广价值。水泥土在组合桩基中扮演着重要的角

色，其特性对于组合桩基的承载性能起着至关重要的作用。ZHOU 等<sup>[10]</sup>、孟祥传等<sup>[11]</sup>、周佳锦等<sup>[12]</sup> 研究表明提高水泥土强度能改善静钻根植竹节桩的承载性能。为了保证施工速率以及水泥土的均匀性，静钻根植竹节桩施工时在钻孔过程中需要注水使钻孔内的土体变为泥浆，并注入水灰比为 1.0 的水泥浆进行充分搅拌。实际工程中钻孔内的泥浆含水量在 50%左右，因此水泥土的含水量较高，搅拌完成后的桩周水泥土呈液态。

已有文献介绍的水泥土含水量基本都在 30% 以下，低于土体液限含水量，水泥土试样为固态，考虑到水泥土含水量是影响其物理力学性质的重要参数，且高含水量水泥土的强度、变形模量、抗剪强度通常小于常规水泥土，在设计 and 施工时要更加注重安全性，因此有必要对制备完成后初始状态为液态（试样含水量高于土体液限含水量）的高含水量水泥土的性质进行研究。本文通过对高含水量水泥土进行室内无侧限抗压强度试验和直剪试验，对其抗压和抗剪性能进行了深入研究，得到不同配比高含水量水泥土的抗压、抗剪参数，并总结出了水泥土强度增长规律以及水泥土抗压、抗剪强度关系，为静钻根植竹节桩等预制桩和水泥土组合桩基的设计提供了依据，同时为有限元建模过程中水泥土材料参数的选取提供依据。

### 1 试样制备

本次试验所采用的试验土样参数见表 1<sup>[13]</sup>。首先，烘干试验土样，其次，通过 1 mm 筛网进行碾碎。所采用的水泥是 P.O52.5 硅酸盐水泥。考虑到目前实际工程中静钻根植桩桩周水泥土配比的情

况（水泥浆水灰比为 1.0，水泥浆与泥浆体积比为 0.5 : 1），决定对已有配比进行优化，制备了 5 组不同配比的水泥土试样，其中水泥浆水灰比均为 1.0，而水泥浆与泥浆体积比分别为 0.05 : 1、0.1 : 1、0.2 : 1、0.3 : 1 和 0.5 : 1。根据现场取样试验结果，泥浆的含水量设定为 50%，而各组水泥土试样的配比见表 2。从表 2 中可以看出，水泥土试样的含水量相对较高，为 53.1%~81.3%，试块的含水量都高于土体的液限含水量；从表 2 中还可以看到，水泥土试样的水泥掺入量在 3.13%~31.30%。

在试样制备过程中，首先将经过 1 mm 筛网的土体颗粒和水泥颗粒按照配比进行充分搅拌，确保均匀混合，然后加入所需用水量并进行充分搅拌，由于试样含水量均高于土体的液限含水量，搅拌完成后试样为液态，如图 1 所示。



图 1 搅拌均匀后的水泥土试样  
Fig. 1 Sample of evenly mixed cemented soil

将充分搅拌均匀的水泥土试样倒入尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的试模中。拆模后，对试样分别进行 3 d、7 d、28 d 和 90 d 的标准养护，并进行无侧限抗压强度试验。考虑到水泥土渗透系数很小，只进行不同配比水泥土的直剪试验，将搅拌均匀后的水泥土倒入直径 61.8 mm、高 20 mm 的环刀中进行制样，并在标准养护室中分别养护 3 d、7 d、28 d 和 90 d 后进行直剪试验。

表 1 试验土样参数

Table 1 Soil sample parameters

土样	重度/(kN/m <sup>3</sup> )	含水量/%	孔隙比 <i>e</i>	塑性指数 <i>I<sub>p</sub></i>	液性指数 <i>I<sub>L</sub></i>	液限/%	塑限/%	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
软黏土	18.5	44	1.089	19	1.105	42	23	10	8

表 2 水泥土试样配比

Table 2 Cemented soil sample ratios

水泥浆与泥浆体积比	水泥土配比（质量比）		水泥掺入量/%	含水量/%	含水量与水泥掺入量的比值
	<i>m</i> <sub>水泥</sub> : <i>m</i> <sub>水</sub> : <i>m</i> <sub>土</sub>				
0.05 : 1	1.0 : 17.0 : 32.0		3.13	53.1	17.0
0.1 : 1	1.0 : 9.0 : 16.0		6.25	56.3	9.0
0.2 : 1	1.0 : 5.0 : 8.0		12.50	62.5	5.0
0.3 : 1	1.0 : 3.7 : 5.3		18.90	69.8	3.7
0.5 : 1	1.0 : 2.6 : 3.2		31.30	81.3	2.6

注：水泥掺入量为*m*<sub>水泥</sub>/*m*<sub>土</sub>；含水量为*m*<sub>水</sub>/*m*<sub>土</sub>。

## 2 无侧限抗压强度试验

完成水泥土试块的养护后,在万能试验机上进行无侧限抗压强度试验。加载过程中采用位移控制法,加载速率为 0.5 mm/min。试验过程中,水泥土试块的应力-应变曲线由试验机上的传感器直接测得。不同配比的水泥土强度与龄期关系曲线如图 2 所示,可以观察到,不同配比的水泥土强度随着龄期的增长而增加,且在 3~7 d 增长幅度最大。然而,随着龄期的增长,水泥土强度的增长幅度逐渐放缓。例如,对于水泥掺入量为 31.3% 的水泥土试样,龄期从 3 d 增加到 7 d 时,水泥土的无侧限抗压强度由 566.8 kPa 增加到 981.6 kPa,增长幅度为 73.2%;龄期由 7 d 增加到 28 d 时,水泥土强度由 981.6 kPa 增加到 1 365 kPa,增长幅度为 39.1%;龄期由 28 d 增加到 90 d 时,水泥土强度由 1 365 kPa 增加到 1 811 kPa,增长幅度为 32.7%。

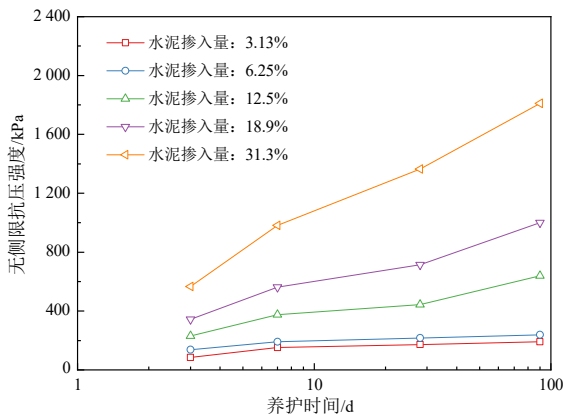


图 2 水泥土强度与龄期关系曲线

Fig. 2 Relationship between strength and curing time of cemented soil

在本次试验中,不同配比水泥土试块龄期由 7 d 增加到 90 d 时,水泥土无侧限抗压强度关系如下:

$$q_{u28} = (1.13 \sim 1.39)q_{u7} \quad (1)$$

$$q_{u90} = (1.10 \sim 1.44)q_{u28} \quad (2)$$

《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)<sup>[14]</sup>中给出的不同龄期水泥土强度的经验公式如下:

$$q_{u28} = (1.59 \sim 2.13)q_{u7} \quad (3)$$

$$q_{u90} = (1.43 \sim 1.80)q_{u28} \quad (4)$$

式中:  $q_u$  代表水泥土无侧限抗压强度,后面的数字

代表水泥土试块龄期。

规范中水泥土强度随龄期的增长幅度经验值大于本次试验中实测水泥土试块的增长幅度,本次试验中水泥土试块含水量较高,可以认为由于试块含水量较高,使水泥土强度随龄期的增长幅度小于规范中给出的经验值。

水泥土强度与水泥掺入量关系曲线如图 3 所示。由图 3 可知,水泥土的强度随着水泥掺入量的增加而增大。以龄期为 3 d 为例,当水泥掺入量由 3.13% 增加到 31.30% 时,水泥土的强度从 85.4 kPa 增加到 566.8 kPa,即水泥掺入量为 31.3% 时的水泥土强度是水泥掺入量为 3.13% 时水泥土强度的 6.64 倍;当龄期增加到 90 d 时,水泥掺入量为 3.13% 和 31.3% 时的水泥土强度分别为 191.4 kPa 和 1 811 kPa,即水泥掺入量为 31.3% 时的水泥土强度是水泥掺入量为 3.13% 时水泥土强度的 9.46 倍。

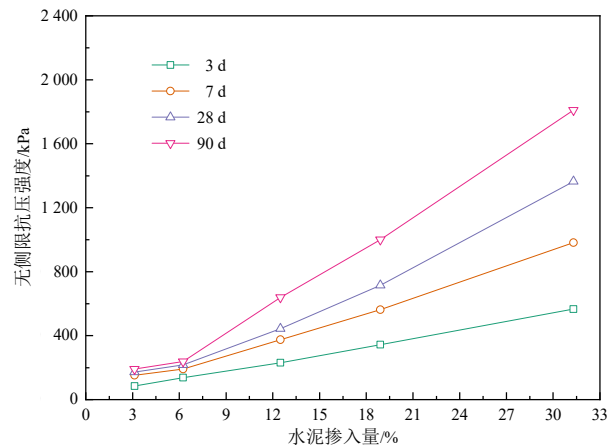


图 3 水泥土强度与水泥掺入量关系曲线

Fig. 3 Relationship between cemented soil strength and cement content

水泥土的含水量和水泥掺入量是影响水泥土强度的重要参数, HORPIBULSUK 等<sup>[15]</sup>指出水泥土的含水量 ( $w$ ) 与水泥掺入量 ( $C$ ) 之比是控制高含水量水泥土性质的重要参数,将本次试验中所得到的不同配比水泥土的试验数据进行整理,得到的不同龄期水泥土强度和含水量与水泥掺入量比值 ( $w/C$ ) 的关系曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看到,采用幂函数可以较好地表述水泥土强度与  $w/C$  的关系,因此水泥土强度可以用下式进行估算:

$$q_u = \frac{a}{(w/C)^b} \quad (5)$$

式中:  $a$ 、 $b$  为常数。

此公式原理与 HORPIBULSUK 等<sup>[15]</sup>提出的公式一致,只是特定的实验参数  $a$ 、 $b$  需要根据特定的实验土体进行实验取值。

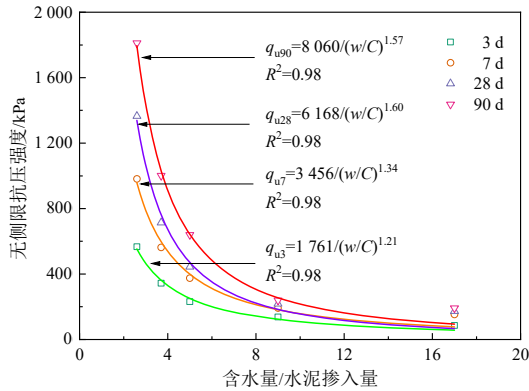


图 4 不同龄期水泥土强度和含水量与水泥掺入量比值的关系

Fig. 4 Relationship between the strength of cemented soil and the ratio of water content to cement content at different curing time

从图 4 中可以看到，式 (5) 中参数 a、b 的数值会随着龄期的改变而变化。当龄期由 3 d 增加到 90 d 时，参数 a 的数值由 1 761 增加到 8 060；当龄期由 3 d 增加到 28 d 时，参数 b 的数值由 1.21 增加到 1.60；而当龄期由 28 d 增加到 90 d 时，参数 b 为 1.57，与龄期为 28 d 时 b 的数值十分接近。可以利用得到的数值 a 和 b 推测不同龄期和不同水灰比下水泥土的无侧限抗压强度。

工程中往往采用龄期为 28 d 的水泥土试块强度作为水泥土强度指标，以龄期为 28 d 的水泥土试块强度为基准得到的本次试验中水泥土强度随龄期的增长规律如图 5 所示，图中 d 为龄期， $q_{ud}$  为龄期为 d 时的水泥土试块强度。从图 5 中可以看到，当时间坐标轴采用对数坐标时，不同配比水泥土的强度与养护时间近似成线性关系。实际工程中仅知道 28 d 龄期水泥土试块强度时，其他不同龄期的水泥土试块强度可用下式进行估算：

$$q_{ud}/q_{u28} = 0.33 + 0.484 \times \lg(d) \quad (6)$$

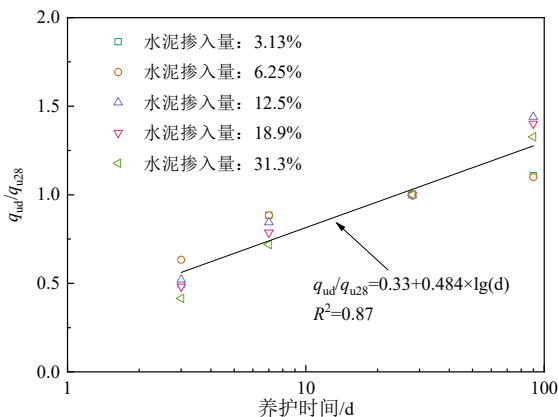


图 5 不同配比水泥土强度随龄期的增长规律

Fig. 5 Increment of cemented soil strength with different proportions over curing time

水泥土的变形模量是通过试验得出的，主要包括三轴试验和无侧限抗压强度试验。在三轴试验中，采用应变控制式三轴压缩仪，通过对水泥土样品施加压力并测量其应变，可以得到变形模量。本文采用无侧限抗压强度试验，在这种试验中，水泥土样品在无侧向约束的条件下受到垂直压力，通过测量样品的应力和应变，可以得到变形模量。常采用的取值依据为平均变形模量  $E_{50}$  [16]。

水泥土强度和平均变形模量关系如图 6 所示。图 6 中拟合曲线的截距设置为 0，可以看到图 6 中的拟合曲线能够较好地表述试验所得水泥土强度与平均变形模量的关系。本次试验中水泥土无侧限抗压强度基本在 100~1 000 kPa，在该范围内水泥土平均变形模量值可近似取  $86.5 q_u$ 。

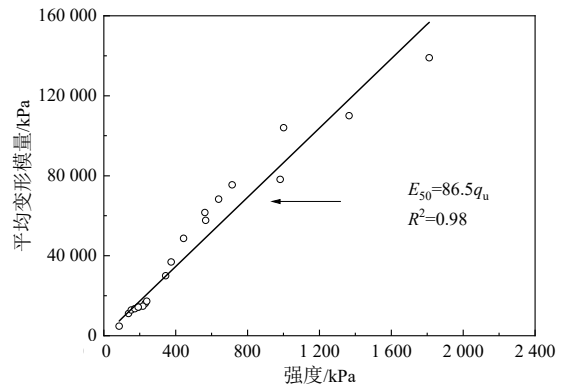


图 6 水泥土强度和平均变形模量关系

Fig. 6 Relationship between strength and average deformation modulus of cemented soil

### 3 直剪试验

在组合桩基中，水泥土作为重要的组成部分，在荷载传递过程中的抗剪性能至关重要。因此，需要进行水泥土的剪切试验，以研究不同配比水泥土的抗剪性能以及抗压、抗剪强度指标之间的关系。由于水泥土的渗透系数较小，直接使用直剪试验测定水泥土试块的抗剪强度，剪切速率为 1.2 mm/min。表 3 展示了不同配比水泥土试块在不同龄期下的黏聚力和内摩擦角数据，其中  $c$  代表水泥土的黏聚力， $\phi$  代表内摩擦角。

将表 3 中所给出的水泥土试块的抗压和抗剪强度数据进行整理，得到水泥土内摩擦角和黏聚力与强度关系分别如图 7 和图 8 所示。从图 7 中可以看到，水泥土的内摩擦角会随着其强度的增加而稳步增大。本次试验中水泥土无侧限抗压强度在 85.4~1 811 kPa，当水泥土强度从 85.4 kPa 增加到 1 811 kPa 时，内摩擦角由 30.4° 增加到 45.0°。

由图8可知,水泥土的黏聚力与强度呈线性增长趋势。为了拟合曲线,设定拟合曲线的截距为0。从图8中可以得出结论,使用 $c=0.18q_u$ 可以较好地描述本次试验中水泥土黏聚力与无侧限抗压强度之间的关系。因此,可以根据该转换公式,在实际工程中通过水泥土试块的无侧限抗压强度值来估算水泥土试块的黏聚力。

根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)<sup>[17]</sup>的规定,黏土和砂土层中桩基极限侧摩阻力的标准值应该在12~130 kPa,因此本次试验中所采用的5组不同配比的水泥土抗剪强度指标(黏聚力范围为19.2~323 kPa)能够满足实际工程中桩周水泥土强度要求,在应用时可以根据实际土层分布及性质再选择合适的桩周水泥土配比。

表3 水泥土试块直剪试验结果

Table 3 Direct shear test results of cemented soil blocks

体积比 (水泥浆:泥浆)	3 d			7 d			28 d			90 d		
	$q_u$ /kPa	$c$ /kPa	$\phi$ (°)	$q_u$ /kPa	$c$ /kPa	$\phi$ (°)	$q_u$ /kPa	$c$ /kPa	$\phi$ (°)	$q_u$ /kPa	$c$ /kPa	$\phi$ (°)
0.05	85.4	19.2	30.4	152.7	28.8	33.0	172.7	32.1	32.6	191.4	38.4	33.4
0.10	137.7	26.0	32.8	192.1	40.0	33.4	217.4	45.0	33.5	239.1	53.6	33.9
0.20	231.1	48.0	33.7	374.8	64.5	34.8	443.8	75.2	34.8	638.9	108.0	38.8
0.30	344.1	60.4	34.5	562.5	103.0	38.2	714.2	140.0	39.0	1 001.0	175.0	39.7
0.50	566.8	103.0	38.4	981.6	165.0	39.7	1 365.0	260.0	41.9	1 811.0	323.0	45.0

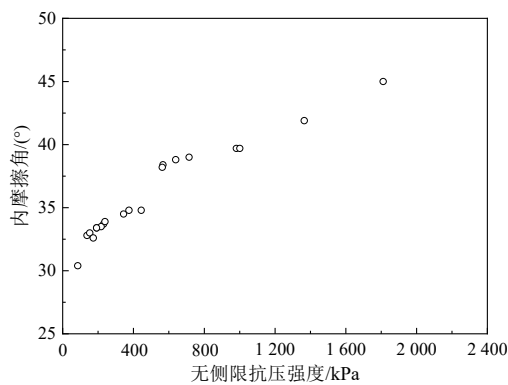


图7 水泥土内摩擦角与强度关系

Fig. 7 Relationship between internal friction angle and strength of cemented soil

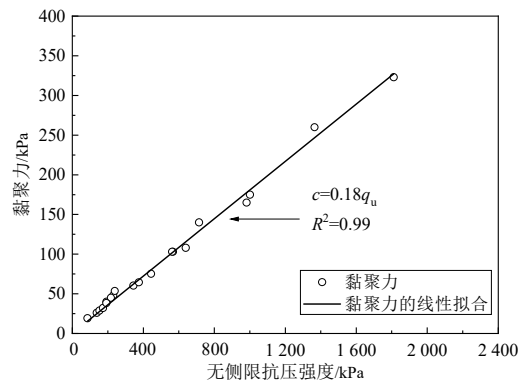


图8 水泥土黏聚力与强度关系

Fig. 8 Relationship between cohesion and strength of cemented soil

## 4 结论

(1) 对于本试验的软黏土,当含水量超过50%时,搅拌均匀的水泥土试样为液态,水泥土的含水量和水泥掺入量是影响水泥土强度的重要因素,本次试验中采用幂函数可以较好地表述水泥土强度与 $w/C$ 的关系,且龄期不同时幂函数中常数参数值不同。

(2) 实际工程中一般只给出龄期28 d时的水泥土强度,可以采用对数函数估算不同龄期时的水泥土强度值;本次试验中水泥土平均变形模量 $E_{50}$ 约为 $86.5q_u$ 。

(3) 水泥土内摩擦角会随其强度的增加而增大,本次试验中水泥土无侧限抗压强度从85.4 kPa增加到1 811 kPa时,其内摩擦角由 $30.4^\circ$ 增加到 $45.0^\circ$ ;水泥土的黏聚力随着强度的增加而呈线性增

长的趋势,而且可以近似认为黏聚力约等于强度的0.18倍。

(4) 本文中所给出的不同配比水泥土的抗压性能、抗剪性能、水泥土强度随龄期的增长规律以及抗压、抗剪关系能够为水泥土复合管桩基础的设计提供依据,同时也能够为有限元建模过程中材料参数的选择提供依据。本次试验中不同配比水泥土组数较少,后续工作中需要增加水泥土试样组数,总结出更为系统的高含水量水泥土的工程特性。

(5) 本文所述水泥土规律受土性、成因、成分等因素影响,本研究结果适合于性质相近的软黏土。

## 参考文献

- [1] 陈昌富,陈兆君,蔡焕. 基于邻域均匀抽样 Bootstrap

- 方法的水泥土无侧限抗压强度演化规律研究[J]. 地基处理, 2021, 3(6): 464-474.
- CHEN Chang-fu, CHEN Zhao-jun, CAI Huan. Study on evolution law of unconfined compressive strength of cement-soil based on neighborhood uniform sampling Bootstrap method[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(6): 464-474.
- [2] 汤怡新, 刘汉龙, 朱伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 549-554.
- TANG Yi-xin, LIU Han-long, ZHU Wei. Study on engineering properties of cement-stabilized soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 549-554.
- [3] 储诚富, 洪振舜, 刘松玉, 等. 用似水灰比对水泥土无侧限抗压强度的预测[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 645-649.
- CHU Cheng-fu, HONG Zhen-shun, LIU Song-yu, et al. Prediction of unconfined compressive strength of cemented soils with quasi-water-cement ratio[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 645-649.
- [4] 李建军, 梁仁旺. 水泥土抗压强度和变形模量试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 473-477.
- LI Jian-jun, LIANG Ren-wang. Research on compression strength and modulus of deformation of cemented soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 473-477.
- [5] CONSOLI N C, FOPPA D, FESTUGATO L, et al. Key parameters for strength control of artificially cemented soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(2): 197-205.
- [6] CONSOLI N C, VIANA DA FONSECAA, CRUZ R C, et al. Fundamental parameters for the stiffness and strength control of artificially cemented sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(9): 1347-1353.
- [7] CONSOLI N C, DA SILVA LOPES L, FOPPA D, et al. Key parameters dictating strength of lime/cement-treated soils[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2009, 162(2): 111-118.
- [8] 董平. 砼芯水泥土搅拌桩荷载传递机理研究[D]. 广州: 中国科学院(广州地球化学研究所), 2004.
- DONG Ping. Load transfer mechanism of concrete-cored DCM pile[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [9] 刘汉龙, 任连伟, 郑浩, 等. 高喷插芯组合桩荷载传递机制足尺模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1395-1401.
- LIU Han-long, REN Lian-wei, ZHENG Hao, et al. Full-scale model test on load transfer mechanism for jet grouting soil-cement-pile strengthened pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1395-1401.
- [10] ZHOU J J, WANG K H, GONG X N, et al. Bearing capacity and load transfer mechanism of a static drill rooted nodular pile in soft soil areas[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering), 2013, 14(10): 705-719.
- [11] 孟祥传, 刘润, 梁超, 等. 饱和黏土不排水抗剪强度特性研究[J/OL]. 土木工程学报, 2023. <https://doi.org/10.15951/j.tmgxcb.23020135>.
- MENG Xiang-chuan, LIU Run, LIANG Chao, et al. Research on undrained shear strength properties of saturated clay[J/OL]. China Civil Engineering Journal, 2023. <https://doi.org/10.15951/j.tmgxcb.23020135>.
- [12] 周佳锦, 龚晓南, 王奎华, 等. 静钻根植竹节桩抗拔承载性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 570-576.
- ZHOU Jia-jin, GONG Xiao-nan, WANG Kui-hua, et al. Behavior of the static drill rooted nodular piles under tension[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3): 570-576.
- [13] 刘用海. 宁波软土工程特性及其本构模型应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- LIU Yong-hai. Study on engineering property and application of constitutive model for Ningbo soft clay[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Ground Treatment of Buildings: JGJ 79—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [15] HORPIBULSUK S, MIURA N, NAGARAJ T S. Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis[J]. Géotechnique, 2003, 53(4): 439-444.
- [16] 陈峰, 赖锦华. 粉煤灰水泥土变形特性实验研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(1): 96-101.
- CHEN Feng, LAI Jin-hua. Experimental study of deformation characteristics of fly ash cement-soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(1): 96-101.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Building Pile Foundations: JGJ 94 — 2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.